1979—2017年CRU、ERA5、CMFD格点降水数据在青藏高原适用性评估

温婷婷， 郭英香， 董少睿， 东元祯， 来晓玲
（青海省气候中心，青海 西宁 810001）

摘 要： 利用1979—2017年青藏高原131个气象台站实测降水资料，分别从年、季尺度对CRU、ERA5和CMFD 3种再分析降水资料在青藏高原的适用性进行了评估。结果表明：(1) CRU、ERA5、CMFD 3种数据对青藏高原年降水的模拟能力都很强，与观测值的相关系数均超过了0.9，较观测降水量值均偏大；CRU和CMFD的春季降水较为接近观测值，CMFD夏、秋季降水与观测值最接近，3种数据对冬季降水模拟能力均较弱。(2) 从降水量分布来看，CMFD数据对青藏高原年、春季、夏季、冬季降水的分布模拟能力最好，3种数据对青藏高原秋季降水的模拟能力具有区域差异性，CRU、CMFD在青藏高原西部的降水与观测值较为接近。(3) 从变化趋势来看，青藏高原年、春季、夏季、秋季降水均呈增加趋势，其中夏季增加幅度较大，冬季降水整体呈减少趋势。(4) CRU数据对青藏高原年、春季、夏季、秋季降水的变化趋势与观测值较为一致，其次为ERA5，ERA5冬季降水与观测值较为一致。(5) 从偏差分析来看，CMFD数据与观测值的年、季降水偏差最小，最接近观测值。(6) 3种数据与站点平均的年、季降水的时间变化序列表明，CMFD的年、春季、夏季、秋季降水与观测值的变化最为接近，其次为CRU；CMFD冬季降水较观测值最为接近，但相关系数未通过95%的显著性检验。

关键词： 青藏高原； 降水； 格点降水资料； 适用性评估

降水作为影响青藏高原地区自然生态系统最活跃、最直接的气候因子，对生态环境具有显著影响，降水异常往往极大程度制约着生态环境的发展，在青藏高原暖湿化大背景下，青藏高原降水整体呈增多趋势，但区域降水的空间差异显著，影响因素不尽一致[1-5]，青藏高原不同区域是否具有一致的变化特征仍有待研究，青藏高原地形复杂，地域广阔，部分地区观测站点稀少，往往代表性差，单站的气候变化并不能全面、准确反映特定区域的气候状况。因此，找到适用于青藏高原的高分辨率降水资料是研究青藏高原气候变化尤其站点稀少区域气候变化的基本保障，无论在业务还是科学研究中都具有重要意义。

已有相当数量的全球降水资料，包括PREC/L（NOAA's Precipitation Reconstruction over Land）、CMAP（CPC Merged Analysis of Precipitation）、GPCP（Global Precipatation Climatology Project）、CRU（Climatic Research Unit）、ERA（European Center for Medium-Range Weather Forecasts）和NCEP（National Center for Environmental Prediction）全球月降水资料等，这些资料均已得到广泛应用。施能等[6]首先对现有不同数据进行了详细介绍，并将其运用到长江中下游的季风降水中，发现已经创建的全球降水量资料有较高的精确度。随着技术改进及融合数据多样化，自勇等[7]将GPCP数据与中国站点观测数据进行了对比，姜贵祥等[8]利用1951—2010年我国东部756个站点实测降水资料，比较分析了PREC、CRU、APHRO和GPCC 4种格点降水资料在我国东部夏季降水变率的可靠性和适用性，发现就中国东部夏季降水变率的EOF模态、主周期而言，GPCC的适用性

收稿日期： 2021-08-17； **修订日期：** 2021-10-27
基金项目： 中国气象局创新发展专项（CXFZ2021Z034）；国家自然科学基金项目（41861013）；青海省基础研究计划项目（2022-ZJ-767）；青海省气候中心自筹项目（qhzxzc2021002）
作者简介： 温婷婷（1992-），女，硕士，工程师，主要从事气候变化及异常诊断研究. E-mail: 790662339@qq.com
通讯作者： 郭英香. E-mail: 526159561@qq.com

更高、更可靠。在此基础上,王红丽等[9-10]将PREC/L、CMAP、GPCP及NCEP2 4种再分析降水资料与台站降水观测资料进行了多年和逐年平均的年、季、月降水量距平的时空相关分析和方差分析,比较了再分析资料对该区降水模拟能力的差异,并对我国东部、东北、华南、华北等地的降水数据适用性相继展开了评估,分析了降水的变化趋势。

近年来,许多学者对西北、青藏高原区域降水的适用性开展了研究,如Wang等[11]通过比较青藏高原63个气象站点的实测资料与MERRA(The Modern EraRetrospective-Analysis for Research and Applications)、NCEP/NCAR-1、CFSR(NCEP Climate Forecast System Reanalysis)、ERA-40、ERA-Interim及GLDAS(Global Land Data Assimilation System)等6种再分析资料,发现GLDAS的降水数据与观测数据最接近;Wang等[12]依据站点融合降水数据比较了2007—2010年拉萨河流域4种基于卫星反演的降水数据(CMORPH实时降水数据、CMOPRH站点校正数据、TMPA实时降水数据和TMPA站点校正数据)质量,结果表明:CMOPRH(CPC MORPHing Technique)2套数据的误差均小于对应的TMPA降水数据,而经过校正的2套数据误差都比二者的实时降水数据误差小[13]。黄浠等[14]以雅鲁藏布江流域为研究区,验证了中国地面降水网格数据、CRU和GLDAS降水数据的精度,并分析了不同源数据降水量年际变化特征和概率分布特性之间的差异。孙畅等[15]基于GPCC和GPCP的降水数据及ERA-interim再分析资料,分析了1979—2012年冬季青藏高原西侧地区降水的基本特征及影响其年际变率的潜在因子,得出青藏高原冬季降水主要发生在其西侧地区且为全区变化一致型,降水所需的水汽主要来自上游地区,从该区域的西边界输入。王坤鑫等[16]利用中国区域地面气象要素数据集(CMFD)和GLDAS数据集研究了色林错流域气候特征和时空变化规律,结果表明:气温的升高和降水的增加使色林错流域在近几十年来呈现显著的暖湿气候背景。对该流域的湖泊扩张机制、生态系统对气候变化的响应以及物候变化等研究具有指示意义。

根据前人的研究可知,由于数据来源和处理过程的差异,不同的资料对不同区域降水特征的描述也不尽相同,因此选取哪一种全球再分析降水资料能较好地反映中国区域降水特征,是值得探究的问题。针对青藏高原的相关研究,多数集中在小区域的适用性评估,多套再分析资料降水数据在整个青藏高原适用性的评估比较缺乏。因此,本文选取CRU、ERA5、CMFD 3种再分析资料与青藏高原降水观测资料进行比较,目的在于找到一种相对更适合青藏高原降水研究的全球再分析资料。一方面为站点稀少地区气候变化研究提供资料来源;另一方面可以较好的研究青藏高原气候变化的区域差异,也便于与气候模式的模拟结果进行比较,为青藏高原气候预测提供一定的理论依据。

1 数据和方法

1.1 站点数据

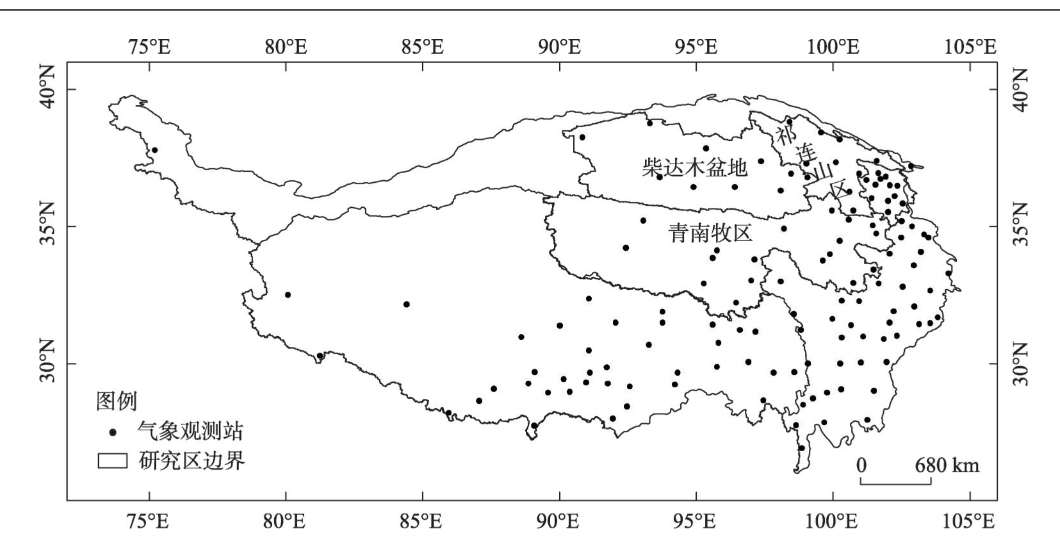
本文所用观测资料为1979—2017年青藏高原地区131个基准气象台站(图1)的逐月降水数据。

1.2 CRU数据

东英吉利大学气候研究中心(CRU)的高分辨率格点化数据集是目前全球使用最为广泛的近地面气候数据集之一。该资料首先选择1961—1990年的气候平均值计算整个时间段各站点的异常值,通过薄板样条插值法插值异常值到格点,再叠加气候平均值最终得到格点资料。CRU数据集包含平均温度、温度日较差、降水、霜天和露天频率、水汽压和云量等气候变量,水平分辨率为0.5°×0.5°。本文使用的CRU TS v4.03(CRU Time series version 4.03)数据,时间选取1979—2017年(https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/)。

1.3 ERA5数据

欧洲中期天气预报中心(ECMWF)作为最早开展4D-Var业务工作的机构,其再分析资料研发也得到0了较早的开展,目前,ECMWF再分析资料已经发展到了第5代,其在1979年发布了第1代再分析资料FGGE,在1994年发布了第2代再分析资料ERA-15,在2001年发布了第3代再分析资料ERA-40,在2006年发布了第4代再分析资料ERA-Interim,2016年发布了第5代再分析数据ERA5的预览版数据,在2017年ECMWF使用4D-Var 20 a之际正式发布了第5代再分析ERA5数据,包括2010年至今的数据,其水平分辨率为0.25°×0.25°,本文选取1979—2017年ERA5月数据开展评估工作(https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets)。



注：青藏高原边界数据来源于国家青藏高原科学数据中心（http://data.tpdc.ac.cn）青藏高原边界数据总集。

图1 青藏高原研究区气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological station in the Tibetan Plateau

1.4 CMFD气象要素数据

中国科学院青藏高原研究所开发的中国区域地面气象要素数据集（CMFD）中的格点气温（2 m）、降水、比湿、风速（10 m）和太阳辐射资料，CMFD数据集以国际上现有的Princeton再分析资料、GLDAS气象驱动资料、GEWEX-SRB辐射资料和TRMM降水资料为背景场，融合了中国气象局常规气象观测数据制作而成，水平分辨率为0.1°×0.1°，数据整体准确度较高，已被广泛应用于水文和气候模拟研究。

1.5 方法

利用线性相关系数来对比分析再分析数据对观测数据的模拟程度，利用相对偏差、平均绝对偏差、均方根误差等比对再分析数据对观测数据的偏离程度。某一变量观测与再分析的相关系数计算公式为：

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{n}(a_i-\bar{a})(o_i-\bar{o})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(a_i-\bar{a})^2(o_i-\bar{o})^2}} \tag{1}$$

相对偏差为：

$$\mathrm{Bias}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\frac{a_i-o_i}{n}}{\sum_{i=1}^{n}\frac{o_i}{n}}\times 100 \tag{2}$$

平均绝对偏差为：

$$\mathrm{Mae}=\sum_{i=1}^{n}\left|a_i-o_i\right|/n \tag{3}$$

均方根误差为：

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[(a_i-\bar{a})(o_i-\bar{o})\right]^2}{n}} \tag{4}$$

式中：n为有效样本数；a和o分别代表再分析资料和观测资料。

泰勒图能够简明地总结统计再分析资料与观测值之间的相匹配程度。基于余弦定理，泰勒图将相关系数、均方根误差和标准差比率3种统计数据显示在一张图中，观测值被定为沿横坐标距离原点1个单位的点，距离原点的环形长度为再分析资料和观测值的方差比率，代表再分析与观测值离散度的相似性；方位角的余弦代表相关系数，再分析距离观测点的长度为再分析与观测之间的均方根误差，距离观测点的长度越短，表明再分析资料越接近观测值。

2 结果与分析

2.1 不同源数据对青藏高原降水的模拟能力

为了综合比较CRU、ERA5、CMFD 3种数据与站点观测降水资料的相似程度，将它们的标准差大小和空间相关系数置于泰勒图中（图2）。从年、季尺度来看，3种数据对青藏高原年总降水整体模拟能力都很强，与观测值的相关系数均超过了0.9，较

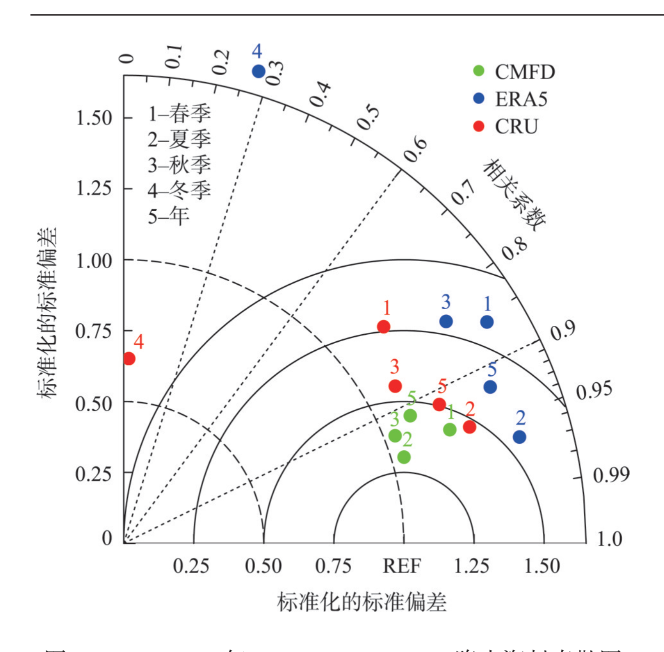


图2 1979—2017年CRU、ERA5、CMFD降水资料泰勒图

Fig. 2 Taylor diagrams of CRU, ERA5, CMFD precipitation from 1979 to 2017 in the Tibetan Plateau

观测降水量值均偏大。季节尺度上，3种数据对青藏高原春、夏、秋季总降水整体模拟能力同样很强，与观测值相关系数在0.73以上，均较观测值偏大，CRU和CMFD的春季降水较为接近，ERA5的春季降水较观测值偏大1.5倍以上，CMFD的夏季降水与观测值最接近，其次为CRU，ERA5夏季降水较观测值同样偏大1.5倍以上，秋季降水与夏季降水模拟能力接近，3种数据对冬季降水模拟能力较弱。

2.2 不同源数据的年、季降水分布

为了更好的做好格点数据与观测数据的对比分析，将站点观测降水数据通过双线性差值方法插值到0.25°×0.25°的格点上，得到观测降水的空间分布图，从年降水的观测值来看，1979—2017年青藏高原降水自东南向西北递减分布，青藏高原西部、柴达木盆地大部分年降水量在100 mm以下，祁连山区、西藏南部年降水量在300~450 mm之间，青藏高原东南部年降水量在550 mm以上（图3a）；对比观测值，CMFD数据和ERA5数据能较好的表征出青藏高原年降水量“西北少、东南多”的空间分布特征，而CMFD数据对降水量级的表征能力最好，ERA5数据对年降水量的量级偏大，而CRU年降水量呈“北少南多”的空间分布特征，从局部来看，柴达木盆地、青藏高原西北部及东南部CRU年降水数据与观测值较为一致（图3）。

青藏高原春季降水观测值显示，青藏高原中西部、北部春季降水量在50 mm以下，东南部大部分春季降水量为60~150 mm，西藏东北部、中南部降水在150 mm以上。对比观测值可知，无论是降水特征的分布，还是量级的大小，CMFD数据对青藏高原春季降水模拟效果最好，ERA5数据表征出青藏高原春季降水在柴达木盆地、青藏高原西南部与观测值接近，青藏高原西北部边缘、东南部、东北部的降水较观测值偏大，CRU降水在柴达木盆地和青藏高原东

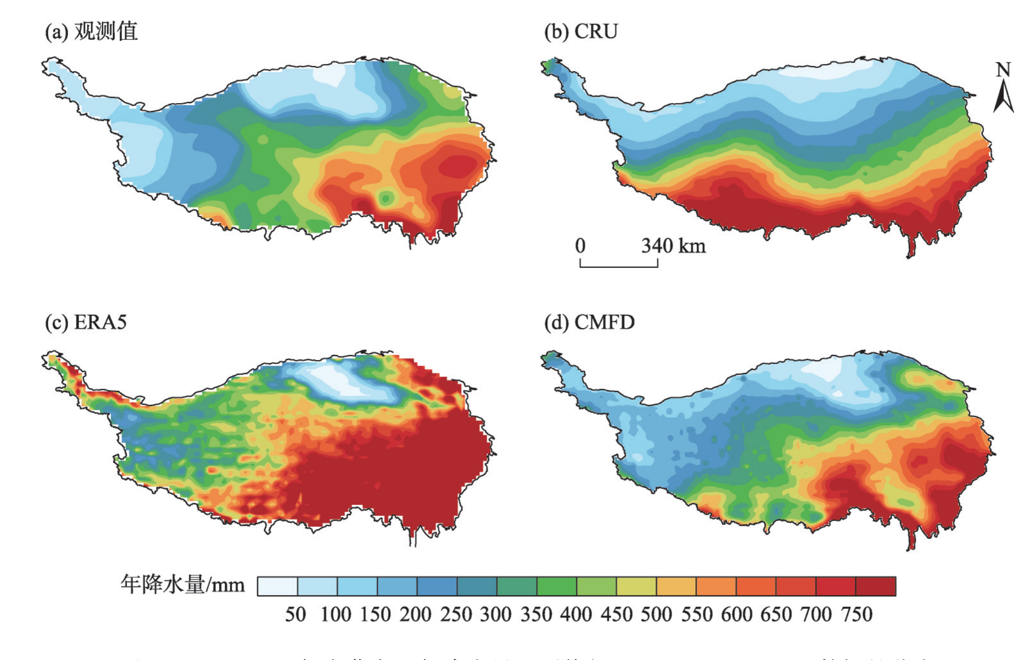


图3 1979—2017年青藏高原年降水量观测值与CRU、ERA5、CMFD数据的分布

Fig. 3 Annual precipitatin distribution of observation, CRU, ERA5 and CMFD from 1979 to 2017 in the Tibetan Plateau

南部与观测值一致，青藏高原中西部春季降水较观测值偏大(图4)。

从观测值来看，青藏高原夏季降水量大部分在50~500 mm之间，青藏高原西部、柴达木盆地降水量在100 mm以下，青藏高原南部、东南部降水量在250~500 mm之间，对比CRU、ERA5、CMFD数据，CMFD的夏季降水量分布与观测值最为接近，其次为ERA5，ERA5数据在青藏高原东南部、南部较观测值整体偏大，约偏大0.75倍，CRU数据在青藏高原西部、柴达木盆地与观测值较为一致，CRU数据在青藏高原南部的夏季降水较观测值明显偏大(图5)。

青藏高原秋季降水观测值显示，秋季降水大部分在0~80 mm之间，青藏高原西部、柴达木盆地依然是降水量最少的区域，在10 mm以下，青藏高原东南部降水量在40~70 mm之间，CRU、ERA5、CMFD 3

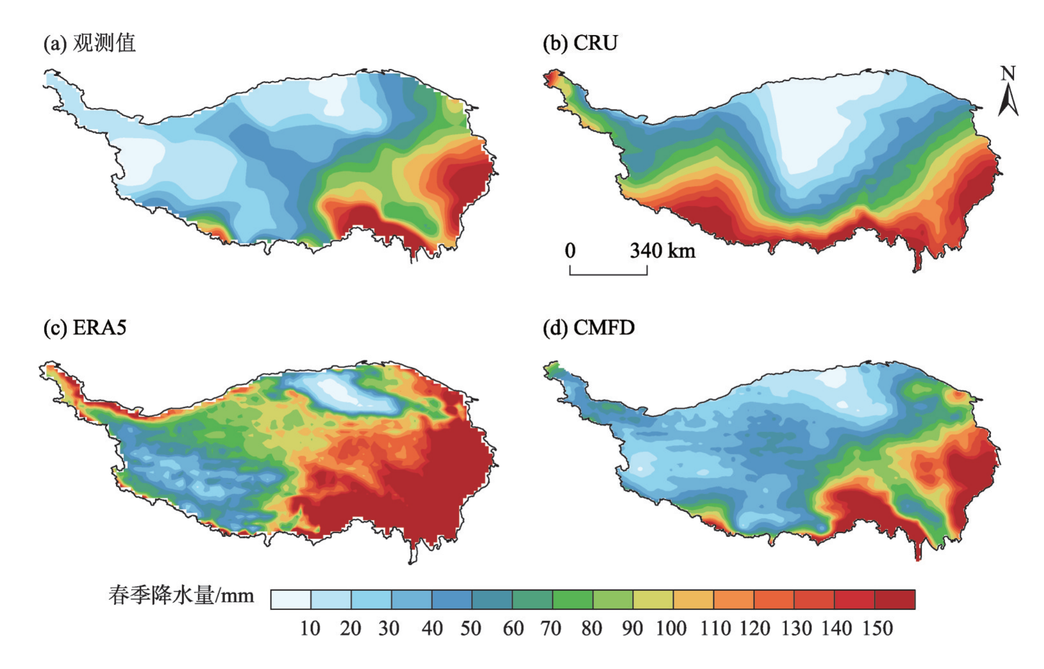


图4　1979—2017年青藏高原春季降水量观测值与CRU、ERA5、CMFD降水量的分布

Fig. 4　Spring precipitatin distribution of observation, CRU, ERA5 and CMFD from 1979 to 2017 in the Tibetan Plateau

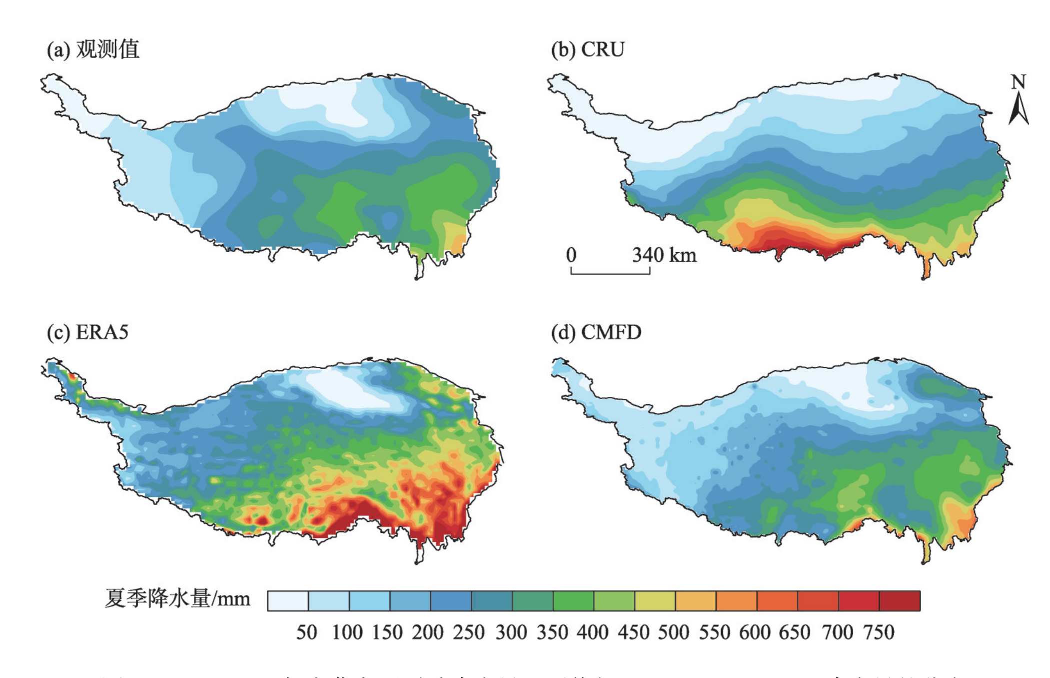


图5　1979—2017年青藏高原夏季降水量观测值与CRU、ERA5、CMFD降水量的分布

Fig. 5　Summer precipitatin distribution of observation, CRU, ERA5 and CMFD from 1979 to 2017 in the Tibetan Plateau

种数据对东南部秋季降水的模拟值均偏大，3种数据在柴达木盆地的降水值均与观测值较为接近，CRU、CMFD在青藏高原西部的降水值与观测值较为接近(图6)。

青藏高原冬季降水量少，观测值显示，青藏高原的冬季年降水量约在0~20 mm之间，降水量大值区主要在青藏高原西南及东南边界，对比可见，CMFD冬季降水分布特征及降水量级与观测值最为接近，ERA5冬季降水量在青藏高原西南部、柴达木盆地与观测值较为一致，其余地区大部分降水量较观测值偏大很多，尤其是青藏高原西南部边界及其东南部；CRU冬季降水呈“西多东少”的分布特征，这与观测值明显不一致，效果较差(图7)。

2.3 不同源降水数据的年、季变化趋势

从年降水的变化趋势来看(图8)，青藏高原大部分地区降水呈增多趋势，约增多5~20 mm·

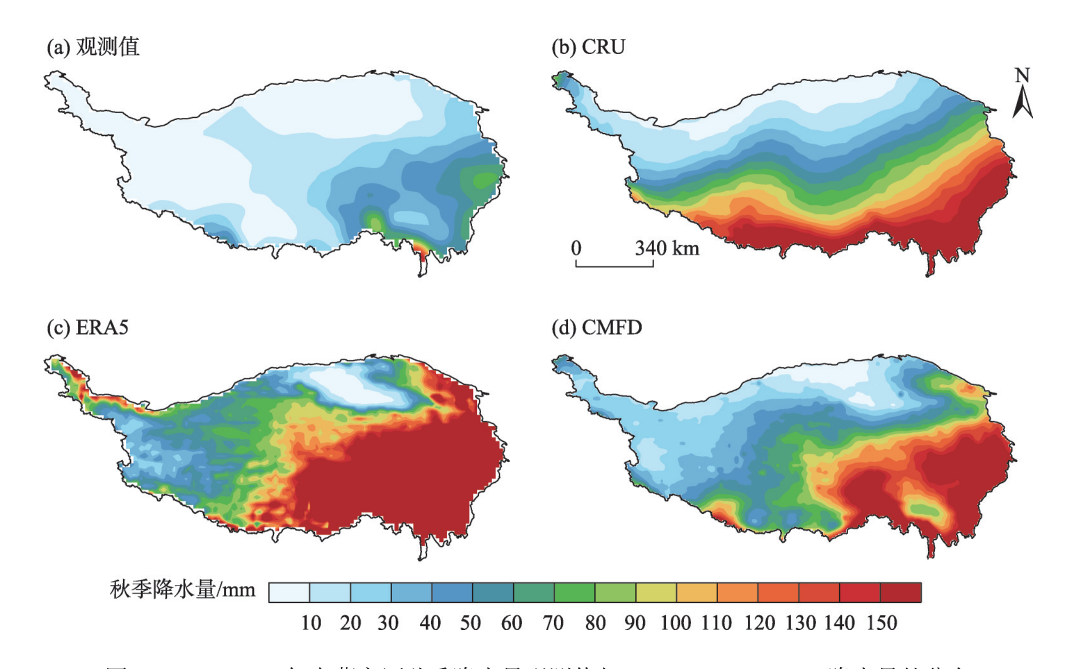


图6 1979—2017年青藏高原秋季降水量观测值与CRU、ERA5、CMFD降水量的分布

Fig. 6 Autumn precipitatin distribution of observation, CRU, ERA5 and CMFD from 1979 to 2017 in the Tibetan Plateau

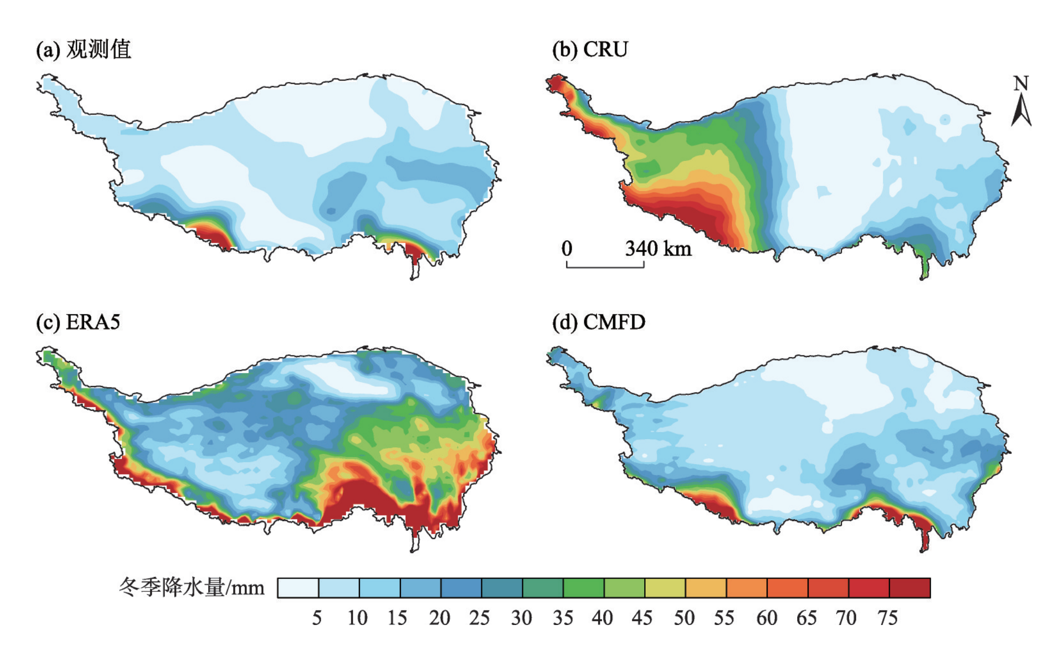
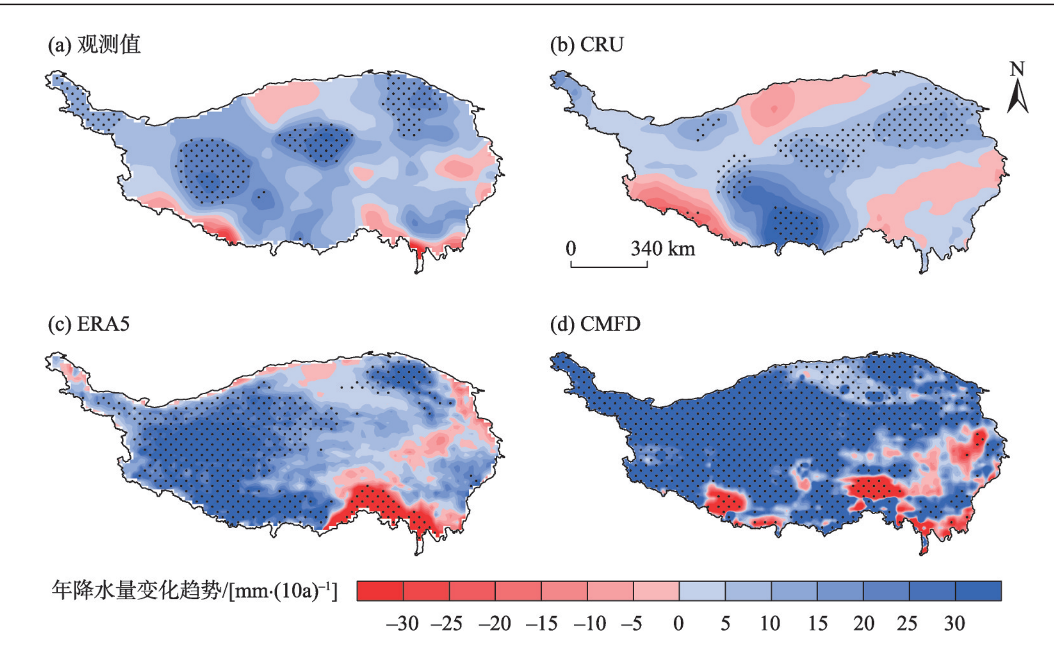


图7 1979—2017年青藏高原冬季降水量观测值与CRU、ERA5、CMFD降水量的分布

Fig. 7 Winter precipitatin distribution of observation, CRU, ERA5 and CMFD from 1979 to 2017 in the Tibetan Plateau



注：打点区域通过了95%显著性检验。下同。

图8　1979—2017年青藏高原年降水量观测数据与CRU、ERA5、CMFD年降水数据变化趋势空间分布

Fig. 8　Annual precipitation variation trend distribution of observation, CRU, ERA5, CMFD from 1979 to 2017 in the Tibetan Plateau

$(10a)^{-1}$，其中祁连山区、三江源区、改则降水增多显著，青藏高原西南部、东南部边缘及柴达木盆地西北部呈减少趋势，约减少5~10 mm·$(10a)^{-1}$；CRU降水的年变化趋势与观测值最为接近，青藏高原东北部、中部、南部年降水呈显著增多趋势，约增加10~30 mm·$(10a)^{-1}$，青藏高原西南部、东南部及北部的柴达木盆地年降水呈减少趋势，其中青藏高原西南部年降水减少显著，约减少15~25 mm·$(10a)^{-1}$；ERA5年降水量整体呈增多趋势，青藏高原南部呈显著减少趋势，约减少15 mm·$(10a)^{-1}$以上，其余大部分呈显著增多趋势，尤其青藏高原西部大部分地区增多30 mm·$(10a)^{-1}$以上；CMFD年降水数据整体呈增多趋势，大部分地区通过95%的显著性检验，青藏高原西南部聂拉木-帕里、东南部边缘、东部局地及南部波密一带降水呈显著减少趋势，最大值约减少50 mm·$(10a)^{-1}$左右，其余大部分降水呈显著增多趋势，尤其是青藏高原西北内陆增多显著，约增多30~50 mm·$(10a)^{-1}$，其次为青藏高原东北部，总体而言，CRU年降水变化趋势与观测值最为接近。

青藏高原春季降水呈整体增多趋势，其中青藏高原西南部普兰、阿里地区呈显著减少趋势，约减少6~12 mm·$(10a)^{-1}$，中部及东部呈显著增加趋势，约增加3~12 mm·$(10a)^{-1}$；CRU春季降水整体呈增加趋势，与观测值较为一致，除青藏高原西南部、北部柴达木盆地呈减少趋势外，大部分地区增多趋势通过95%显著性检验，自北向南降水增多逐步加强，约增多5~20 mm·$(10a)^{-1}$；ERA5春季降水显示，青藏高原西部边缘、北部及南部察隅地区呈减少趋势，其中青藏高原西部边缘降水减少趋势通过95%显著性检验，其余大部分降水呈增加趋势；CMFD春季降水显示，青藏高原春季降水呈显著增多趋势，增多率在3~18 mm·$(10a)^{-1}$之间，南部局地波密降水减少显著，减少速率在10~20 mm·$(10a)^{-1}$。由图9比较可得，CRU春季降水整体呈增加趋势，与观测值较为一致，其次为ERA5。

青藏高原东北部、柴达木盆地、东南部青南牧区及西藏波密地区夏季降水呈减少趋势，约减少2~20 mm·$(10a)^{-1}$，其余大部分地区降水呈增加趋势，其中青海省北部、西藏改则地区夏季降水增加显著，约增加10~25 mm·$(10a)^{-1}$；CRU夏季降水的变化趋势与观测值较为一致，青藏高原东部红原、若尔盖一带夏季降水显著减少，约减少10~20 mm·$(10a)^{-1}$，错那、帕里一带降水显著增多，约为25 mm·$(10a)^{-1}$；ERA5夏季降水的变化趋势与观测值的相似度仅次于CRU数据，ERA5夏季降水在青藏高原西部增加20 mm·$(10a)^{-1}$以上；从CMFD夏季降水来看，青藏高原东南部降水减少最为显著，大部分减少速率在10~30 mm·$(10a)^{-1}$，局部地区减少速率在

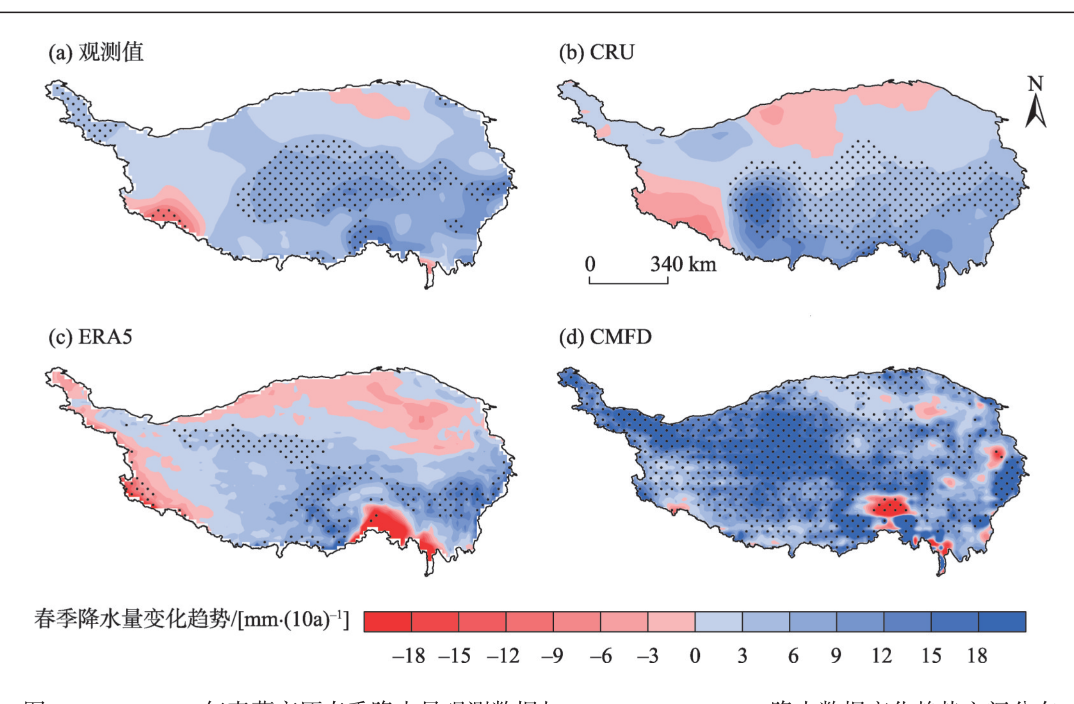


图9　1979—2017年青藏高原春季降水量观测数据与CRU、ERA5、CMFD降水数据变化趋势空间分布

Fig. 9　Spring precipitation variation trend distribution of observation, CRU, ERA5, CMFD from 1979 to 2017 in the Tibetan Plateau

50 mm·(10a)$^{-1}$以上,青藏高原中西部和其他数据一样,为显著增加区域(图10)。

青藏高原秋季降水趋势为南部及中西部呈减少区域(图11),约减少3~15 mm·(10a)$^{-1}$,其余大部分呈增加趋势,青藏高原东南部的青南牧区、玛曲及红原为秋季降水显著增加区域,约增加3~9 mm·(10a)$^{-1}$;CRU秋季降水趋势为,青藏高原南部、中西部呈减少趋势,约减少3~18 mm·(10a)$^{-1}$,青藏高原东部秋季降水增多显著,均通过了95%显著性检验,约增多3~9 mm·(10a)$^{-1}$,与观测值变化较为一致;ERA5对青藏高原秋季降水变化趋势的模拟仅次于CRU,青藏高原北部降水增加显著,均通过了95%的显著性检验,约增加3~9 mm·(10a)$^{-1}$,降水减少显著区域在青藏高原南部,尤其察隅一带减少显

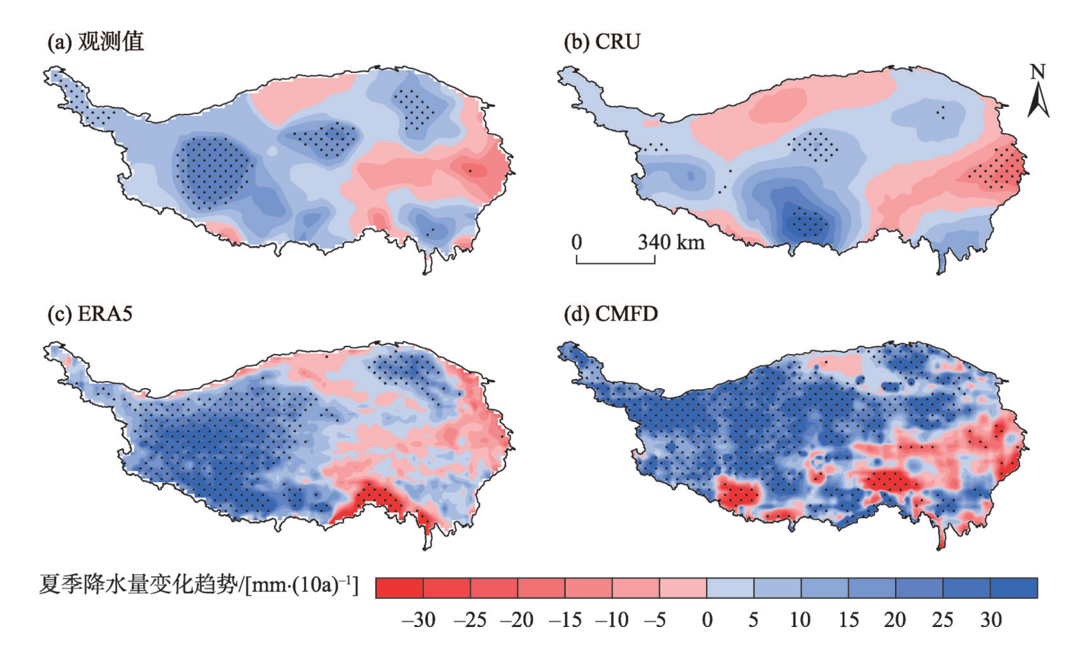


图10　1979—2017年青藏高原夏季观测数据与CRU、ERA5、CMFD降水数据变化趋势空间分布

Fig. 10　Summer precipitation variation trend distribution of observation, CRU, ERA5, CMFD from 1979 to 2017 in the Tibetan Plateau

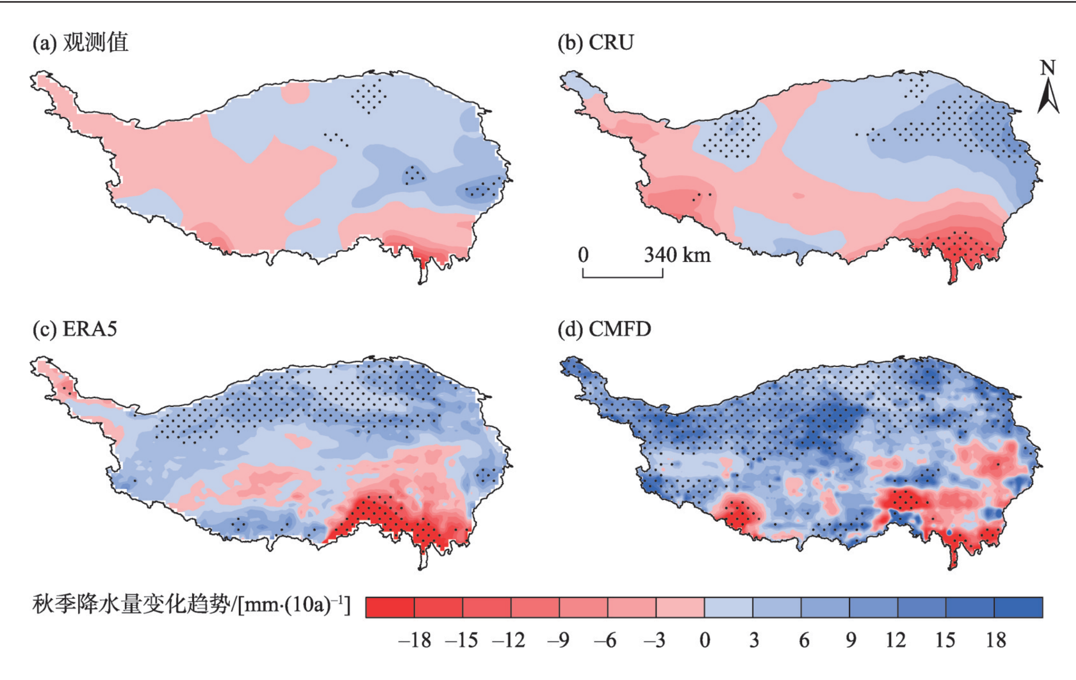


图11　1979—2017年青藏高原秋季观测数据与CRU、ERA5、CMFD降水数据变化趋势空间分布

Fig. 11　Autumn precipitation variation trend distribution of observation, CRU, ERA5, CMFD from 1979 to 2017 in the Tibetan Plateau

著，为12 mm·(10a)$^{-1}$以上；CMFD秋季降水整体呈增多趋势，青藏高原北部降水增加明显，均通过了95%的显著性检验，青藏高原北部大部分地区降水增多，在6~18 mm·(10a)$^{-1}$，降水减少显著区在青藏高原东南端，为15 mm·(10a)$^{-1}$以上。

观测值表明，青藏高原东北部、西北角及东南局部冬季降水呈增加趋势，增加趋势在0~2 mm·(10a)$^{-1}$，青藏高原南部、西北部主体冬季降水呈减少趋势，其中青藏高原南部聂拉木、察隅减少趋势明显，在2~10 mm·(10a)$^{-1}$，但未通过95%的显著性检验；CRU冬季降水整体呈减少趋势，除青藏高原西北部及东北部边缘冬季降水呈增多趋势外，其余大部分呈显著减少趋势，青藏高原西南部、南部边缘冬季降水约减少4~10 mm·(10a)$^{-1}$；ERA5冬季降水整体同样为减少趋势，显著减少区域同样在青藏高原南部察隅一带，与观测值较为一致；CMFD冬季降水整体呈显著增加趋势，约2~8 mm·(10a)$^{-1}$，显著减少区域同样在高原南部边缘(图12)。

2.4　不同源年、季降水数据的偏差分析

由于3种再分析降水数据的水平分辨率不一致，为了更好的进行一致性分析，先将观测值、CRU、ERA5、CMFD降水数据统一处理成为0.25°×0.25°的格点数据，用再分析数据减去观测值得到偏差空间分布图；并用青藏高原范围内的格点平均计算了降水整体的偏差、均方根误差。

由图13可以看出，年降水，CRU年数据与观测值相比，降水量整体偏少70.73 mm，较观测值偏少14.5%，均方根误差为27.66 mm(表1)，从空间分布来看，青藏高原西南部大部分地区偏多160~400 mm左右，其余大部分地区偏少80~240 mm，ERA5年降水量较观测值整体偏多193.11 mm，偏多39.5%，均方根误差为36.8 mm(表1)，除柴达木盆地略偏少40 mm左右外，其余大部分区域均偏多，尤其青藏高原东南部偏多360 mm以上，CMFD年降水较观测值整体偏少112.55 mm，偏少23.02%，均方根误差为54.7 mm，3种数据的年际降水偏差均未通过95%的显著性检验；春季，CRU春季降水较观测值整体偏少10.04 mm(12.33%)，均方根误差为12.22 mm，青藏高原仍呈西南偏少(40~160 mm)、其余地区偏多(0~40 mm)的分布态势，ERA5春季降水较观测值整体偏多41.51 mm(50.96%)，均方根误差为7.97 mm(表1)，青藏高原大部分地区偏多0~40 mm，CMFD春季降水偏差在−40~40 mm，分布较为分散，整体较观测值偏少18.66 mm(22.91%)，均方根误差为16.32 mm，CRU和ERA5均通过95%的显著性检验；夏季，CRU夏季降水较观测值整体偏少44.1 mm(15.02%)，均方根误差为21.91 mm，呈南部偏多(120~400 mm)、北部偏少(80~160 mm)的态势，其

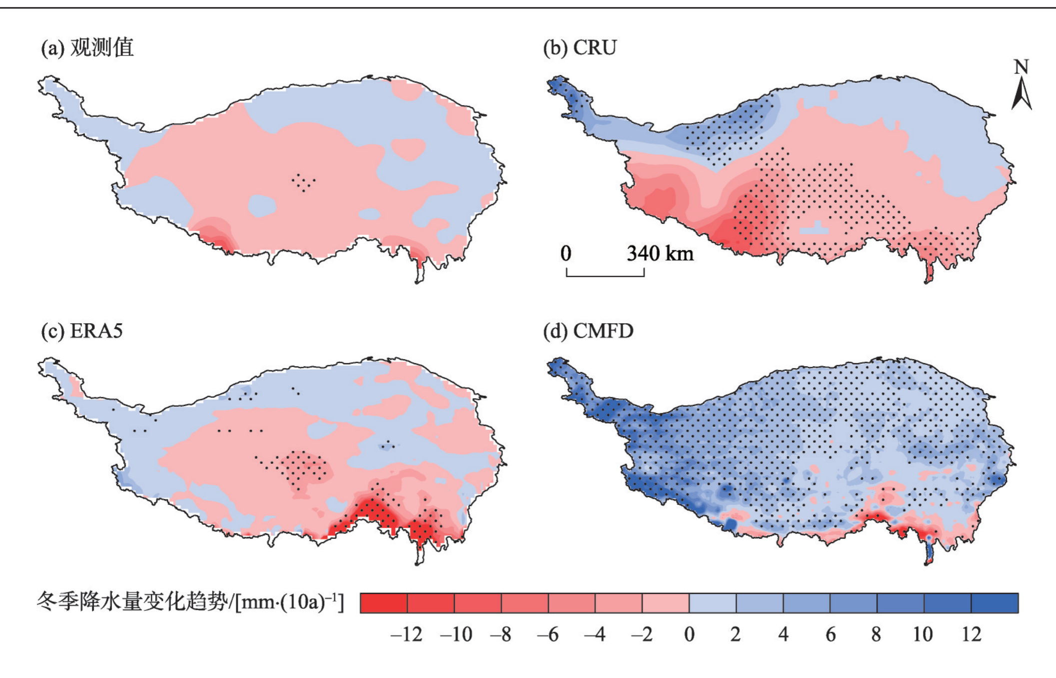


图12 1979—2017年青藏高原冬季观测数据与CRU、ERA5、CMFD降水数据变化趋势空间分布

Fig. 12 Winter precipitation variation trend distribution of observation, CRU, ERA5, CMFD from 1979 to 2017 in the Tibetan Plateau

中柴达木盆地略呈偏多态势(0~80 mm),ERA5夏季降水较观测值整体偏多84.23 mm(28.68%),均方根误差为30.24 mm(表1),在青藏高原整体偏多40~120 mm,CMFD夏季降水较观测值整体偏少67.98 mm(23.15%),均方根误差为32.71 mm,空间偏差最小,未通过95%的显著性检验,CRU、ERA5均通过95%的显著性检验;秋季,CRU秋季降水较观测值整体偏少31.45 mm(30.01%),均方根误差为8.7 mm,青藏高原南部偏多(40~160 mm)、北部偏少(0~40 mm),ERA5秋季降水在青藏高原较观测值整体偏多32.76 mm(31.26%),均方根误差为8.7 mm,空间分布整体偏多0~40 mm,CMFD秋季降水较观测值整体偏少28.92 mm(27.59%),均方根误差为12.34 mm,空间分布偏差最小,未通过95%的显著性检验,CRU、ERA5均通过95%的显著性检验;冬季,CRU冬季降水较观测值整体偏多14.63 mm(161.9%),均方根误差为5.22 mm,空间分布上,整个青藏高原呈西部偏多(0~50 mm)、东部偏少(0~40 mm)的态势,ERA5冬季降水在青藏高原整体偏多34.61 mm(382.93%),均方根误差为5.6 mm(表1),空间分布来看,冬季降水整体较观测值偏多40~120 mm,CMFD冬季降水较观测值偏多3.13 mm(34.68%),均方根误差为5.1 mm,空间偏差最小,未通过95%的显著性检验,CRU、ERA5降水通过了95%的显著性检验。

将格点数据插值到131个站点,求取逐年的站点平均,由图14可见,年降水、春季降水、夏季降水、秋季降水的观测值与CRU、ERA5及CMFD的相关系数均在0.75~0.98之间,均通过了95%的显著性检验,其中CRU、CMFD与观测值的变化很接近,CMFD与观测值的相关系数最好,ERA5的降水值较观测值明显偏大;冬季降水,CRU、ERA5及CMFD的相关系数分别为-0.03、0.36、-0.05,只有ERA5通过了95%的显著性检验,CMFD较观测值最为接近,但未通过95%的显著性检验,CRU和ERA5较观测值均偏多。

3 讨 论

青藏高原站点稀少,尤其是青藏高原西北部几乎没有观测台站,青藏高原作为全球气候变暖响应的敏感区,青藏高原的气候变化状况一直都备受关注,仅仅依靠站点数据来客观、准确、全面的认识青藏高原的气候变化是不现实的,寻找到在青藏高原站点密集、代表性好的数据具有重要意义,也是当前气象业务发展的必然要求。关于多源降水在青藏高原的适用性评估工作,多是围绕青藏高原局部开展,例如雅鲁藏布江流域、色林错流域、青藏高原西侧等都是利用格点数据揭示站点稀少地区的气候变化特征。关于格点降水数据在青藏高原整体

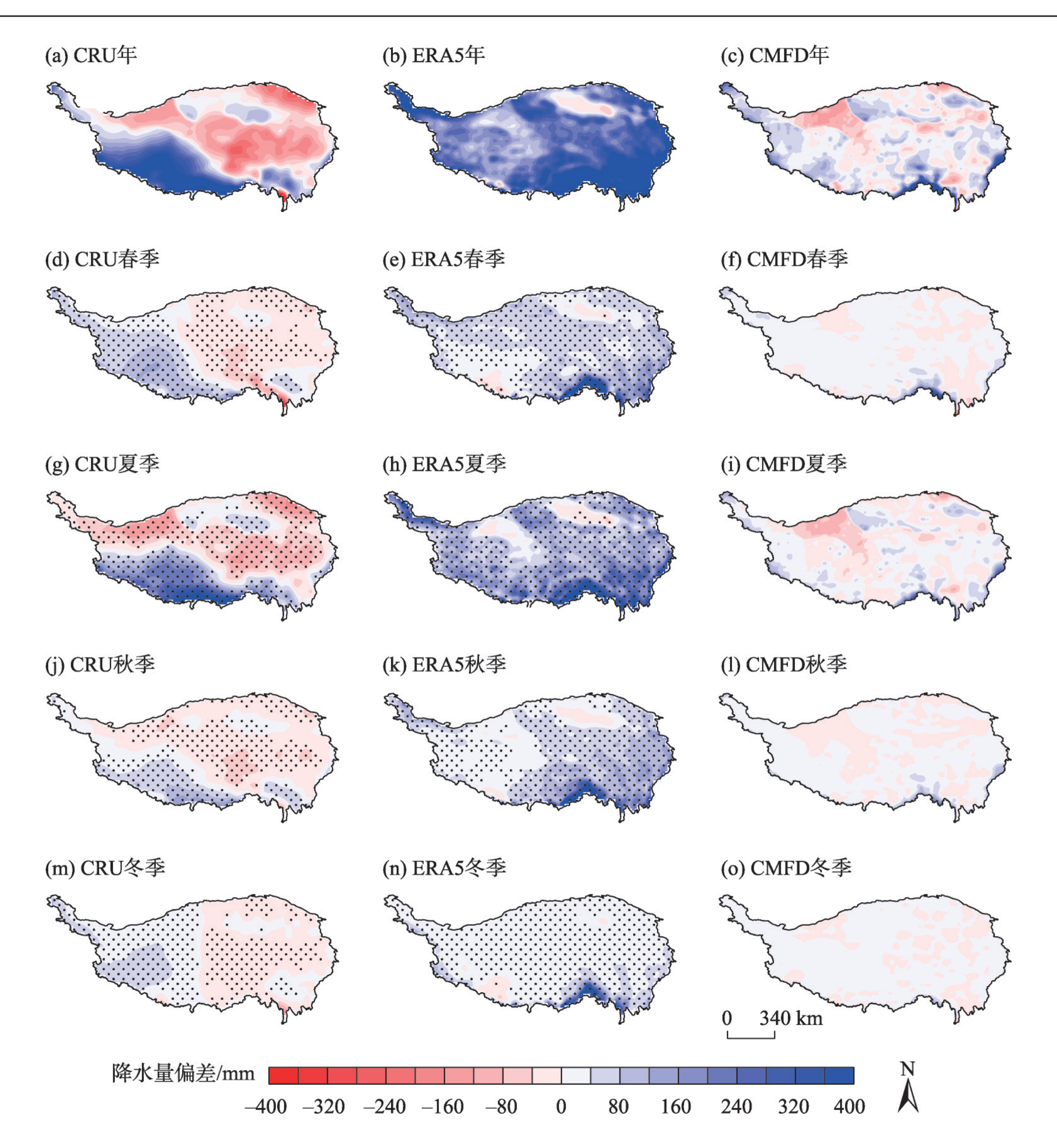


图13 1979—2017年ERA5、CRU、CMFD年、季降水量的偏差

Fig. 13 Annual and seasonal precipitation difference distribution of ERA5, CRU, CMFD with observation from 1979 to 2017 in the Tibetan Plateau

表1 1979—2017年CRU、ERA5、CMFD年、季降水与观测值的偏差、百分比及均方根误差

Tab. 1 Difference, percentage and root mean square error of CRU, ERA5 and CMFD precipitation compared to observation precipitation in annual and seasonals from 1979 to 2017 in the Tibetan Plateau

	与观测值的降水偏差/mm			与观测值的降水偏差百分比/%			均方根误差/mm		
	CRU	ERA5	CMFD	CRU	ERA5	CMFD	CRU	ERA5	CMFD
春季	−10.04	41.51	−18.66	−12.33	50.96	−22.91	12.22	7.97	16.32
夏季	−44.10	84.23	−67.98	−15.02	28.68	−23.15	21.91	30.24	32.71
秋季	−31.45	32.76	−28.92	−30.01	31.26	−27.59	8.70	12.01	12.34
冬季	14.63	34.61	3.13	161.90	382.93	34.68	5.22	5.60	5.10
年	−70.73	193.11	−112.55	−14.46	39.49	−23.02	27.66	36.80	54.70

的适用性评估工作才刚刚开展，文中选取了应用较为广泛的3种格点降水数据，分析了其在青藏高原的适用性，ERA5数据对青藏高原夏季降水的模拟能力与谢欣汝等[17]的研究结果一致，CRU数据对青藏高原年、夏季、冬季降水的模拟能力与姜贵祥等[8,12]的研究结果一致，但目前世界上的模式数据

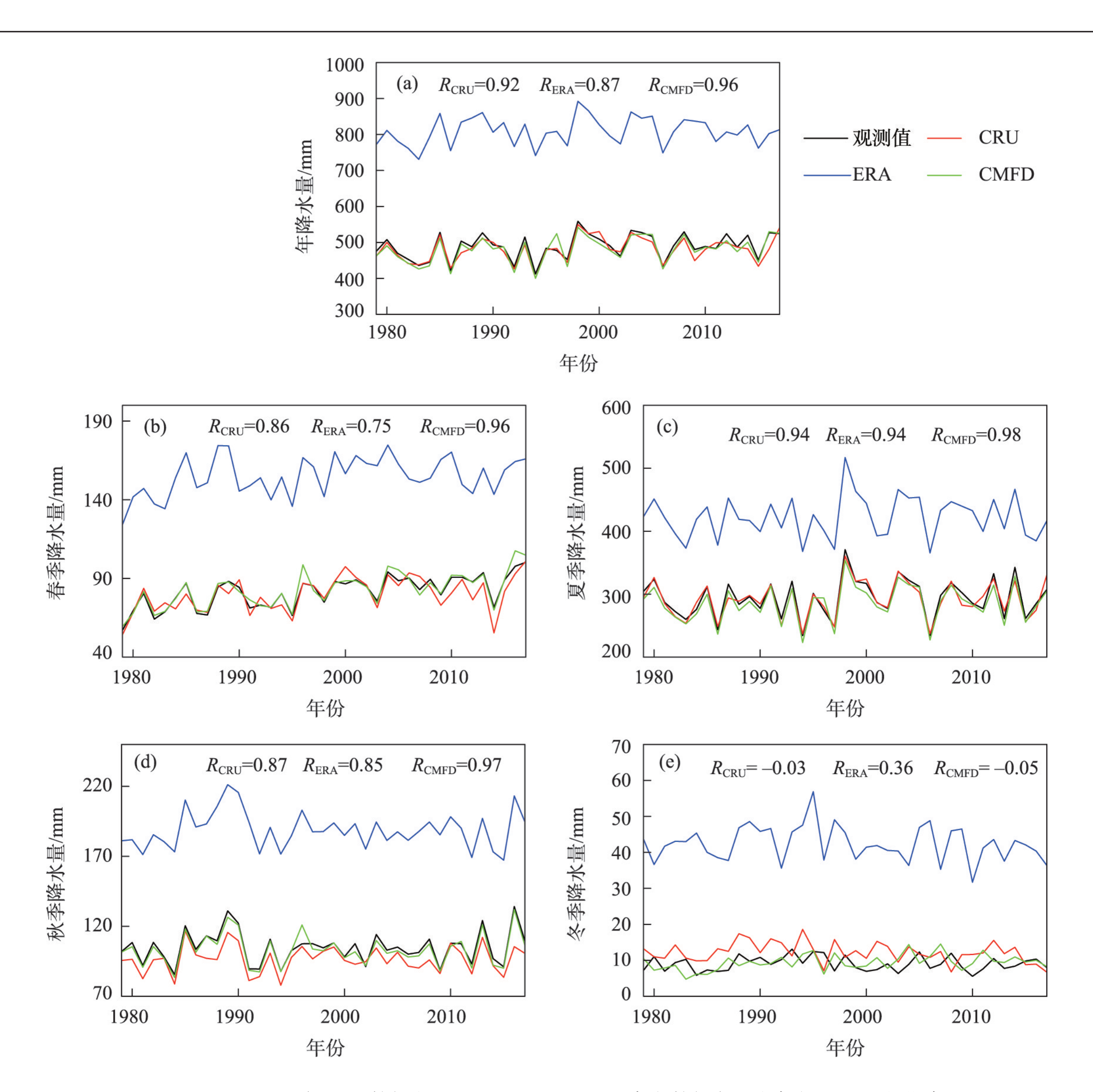


图14 1979—2017年观测数据与ERA5、CRU、CMFD降水数据年、季降水量时间变化序列

Fig. 14 Annual and seasonal precipitation timeseries of ERA5, CRU and CMFD from 1979 to 2017 in the Tibetan Plateau

种类较多,评估结果具有一定的相对性。此外,为了便于与多套格点数据在空间上进行各物理量的对比,对青藏高原站点降水数据进行了插值,因此文中对青藏高原西北部再分析资料的评估存在一定的误差。

4 结 论

通过对青藏高原年、季站点观测降水与3种再分析数据的时空特征、变化趋势及偏差的比较分析,得出以下结论:

(1) 整体而言,CRU、ERA5、CMFD 3种数据对青藏高原年总降水量的整体模拟能力都很强,与观测值的相关系数均超过0.9,较观测的降水量均偏大;春季,CRU和CMFD春季降水较为接近观测值,夏季,CMFD夏季降水最接近观测值,秋季降水与夏季降水模拟能力接近,3种数据对冬季降水模拟能力较弱。

(2) CMFD数据对青藏高原年、春季、夏季降水特征分布和量级大小的模拟能力都很好;秋季,CRU、ERA5、CMFD对降水的模拟能力具有区域差异性,3种数据对青藏高原东南部的降水的模拟均偏大,3种数据在青藏高原北部柴达木盆地的降水均与观测值较为接近,CRU、CMFD在青藏高原西部的降水与观测值较为接近;冬季,CMFD的降水分布特征及降水量级与观测值最为接近。

(3) 变化趋势:从年降水来看,青藏高原大部分降水呈增多趋势,约增多5~20 mm·(10a)$^{-1}$;春季降

水整体为增多趋势，青藏高原西南部的普兰、阿里地区呈显著减少趋势，约减少6~12 mm·(10a)$^{-1}$；夏季，青藏高原东部、东南部的青南牧区及西藏的波密约减少2~20 mm·(10a)$^{-1}$，其余大部分夏季降水呈增多趋势；秋季，青藏高原南部、中西部秋季降水约减少3~15 mm·(10a)$^{-1}$，其余大部分秋季降水呈增多趋势，青藏高原东南部的青南牧区、玛曲及红原显著增多3~9 mm·(10a)$^{-1}$；冬季，青藏高原东北部、西北角及东南部局部冬季降水增多约0~2 mm·(10a)$^{-1}$，青藏高原南部、西北部冬季降水减少约2~10 mm·(10a)$^{-1}$。CRU数据在青藏高原年、春季、夏季、秋季降水的变化趋势与观测值较为一致，其次为ERA5，ERA5冬季降水与观测值较为一致。

（4）偏差分析：CMFD数据与青藏高原年、季降水观测值的偏差最小，最接近观测值，偏差均未通过显著性检验。

（5）时间变化序列：CMFD数据与青藏高原年降水、春季降水、夏季降水、秋季降水的变化最为接近，其次为CRU；CMFD冬季降水较观测值最为接近，但相关系数未通过95%的显著性检验；ERA5在年、春季、夏季、秋季及冬季的降水量较观测值均偏大。

参考文献(References)：

[1] 姚檀栋, 朴世龙, 沈妙根, 等. 印度季风与西风相互作用在现代青藏高原产生连锁式环境效应[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(9): 976–984. [Yao Tandong, Piao Shilong, Shen Miaogen, et al. Chained impacts on modern environment of interaction between westerlies and indian monsoon on Tibetan Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(9): 976–984.]

[2] 葛根巴图, 魏巍, 张晓, 等. 柴达木盆地极端气候时空趋势及周期特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 304–313. [Ge Genbatu, Wei Wei, Zhang Xiao, et al. Spatiotemporal trends and periodic features of climate extremes over the Qaidam Basin, China, during 1960–2014[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 304–313.]

[3] 张旺雄, 刘普幸. 1961—2017年柴达木盆地干湿状况及其影响因子[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1391–1400. [Zhang Wangxiong, Liu Puxing. Surface humid situation and its affecting factors in the Qaidam Basin from 1961 to 2017[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1391–1400.]

[4] 韩进军, 王建萍, 陈亮, 等. 影响柴达木盆地降水量变化的主要天气动力因素[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 314–324. [Han Jinjun, Wang Jianping, Chen Liang, et al. The main weather dynamic factors affecting precipitation change in the Qaidam Basin[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 314–324.]

[5] 米玛卓嘎, 秦增良, 肖卓靖, 等. 西藏夏季降水特征及其预测分析[J]. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1060–1069. [Mirmah Zhuoga, Qin Zengliang, Xiao Zhuojing, et al. Summer precipitation in Tibet and its prediction[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(5): 1060–1069.]

[6] 施能, 陈绿文, 林振敏. 全球降水与区域性季风降水相关分析[J]. 气象科技, 2002(2): 73–79. [Shi Neng, Chen Lvwen, Lin Zhenmin. Correlation analysis between global precipitation and regional monsoon precipitation[J]. Meteorological Science and Technology, 2002(2): 73–79.]

[7] 自勇, 许吟隆, 傅云飞. GPCP与中国台站观测降水的气候特征比较[J]. 气象学报, 2007, 65(1): 63–74. [Zi Yong, Xu Yinlong, Fu Yunfei. Climatological comparison studies between GPCP and raingauges precipitations in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007, 65(1): 63–74.]

[8] 姜贵祥, 孙旭光. 格点降水资料在中国东部夏季降水变率研究中的适用性[J]. 气象科学, 2016, 36(4): 448–456. [Jiang Guixiang, Sun Xuguang. Application of grid precipitation datasets in summer precipitation variability over East China[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2016, 36(4): 448–456.]

[9] 王红丽, 刘健, 况雪源. 四种再分析资料与长江中下游地区降水观测资料的对比研究[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(5): 703–711. [Wang Hongli, Liu Jian, Kuang Xueyuan. Comparison of four reanalysis precipitation datasets and observation over the middle-lower reaches of the Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(5): 703–711.]

[10] 刘丹丹, 梁丰, 王婉昭, 等. 基于GPCC数据的1901—2010年东北地区降水时空变化[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 124–131. [Liu Dandan, Liang Feng, Wang Wanzhao, et al. Spatial and temporal variations of precipitation in Northeast China from 1901 to 2010 based on GPCC data[J]. Research of Soil and Waterv Conservation, 2017, 24(2): 124–131.]

[11] Wang A H, Zeng X B. Evaluation of multireanalysis products with in situ observations over the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, 117(D5): D05102.

[12] Wang Dan, Wang Aihui. Applicability assessment of GPCC and CRU precipitation products in China during 1901 to 2013[J]. Climatic and Environmental Research, 2017, 22(4): 446–462.

[13] Wang S, Liu S X, Mo X G, et al. Evaluation of remotely sensed precipitation and its performance for streamflow simulations in basins of the Southeast Tibetan Plateau[J]. Journal of Hydrometeorology, 2015, 16(6): 2577–2594.

[14] 黄浠, 王中根, 桑燕芳, 等. 雅鲁藏布江流域不同源降水数据质量对比研究[J]. 地理科学进展, 2016, 35(3): 339–348. [Huang Xi, Wang Zhonggen, Sang Yanfang, et al. Precision of data in three precipitation datasets of the Yarlung Zangbo River Basin[J]. Progress in Geography, 2016, 35(3): 339–348.]

[15] 孙畅, 王子谦, 杨崧. 青藏高原西侧地区冬季降水的年际变率及其影响因子[J]. 大气科学, 2019, 43(2): 350–360. [Sun Chang, Wang Ziqian, Yang Song. Interannual variability of winter precipitation over the western side of Tibetan Plateau and its impact factors[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(2): 350–

360.]

[16] 王坤鑫, 张寅生, 张腾, 等. 1979—2017年青藏高原色林错流域气候变化分析[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 652-662. [Wang Kunxin, Zhang Yinsheng, Zhang Teng, et al. Analysis of climate in the Selin Co Basin, Tibetan Plateau from 1979 to 2017[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 652-662.]

[17] 谢欣汝, 游庆龙, 保云涛, 等. 基于多源数据的青藏高原夏季降水与水汽输送的联系[J]. 高原气象, 2018, 37(1): 78-92. [Xie Xinru, You Qinglong, Bao Yuntao, et al. The connection between the precipitation and water vapor transport over Qing-hai-Tibetan Plateau in summer based on the multiple datasets[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(1): 78-92.]

Assessment of CRU, ERA5, CMFD grid precipitation data for the Tibetan Plateau from 1979 to 2017

WEN Tingting, GUO Yingxiang, DONG Shaorui, DONG Yuanzhen, LAI Xiaoling

(Qinghai Climate Centre, Xining 810001, Qinghai, China)

Abstract: In this paper, CRU, ERA5, and CMFD precipitation data for the Qinghai-Xizang Plateau were evaluated on annual and seasonal scales and compared with observed precipitation data from 131 weather stations. (1) The three data types all showed a strong ability to describe total annual precipitation on the plateau, and their correlation coefficients with the observed values were all >0.9. Results from all three models were generally higher than observed precipitation. CRU and CMFD results were closest to observed values in spring, while CMFD results were closest to the observed values in summer and fall; all three models showed the weakest correlations with observed values for winter precipitation. (2) In terms of precipitation distribution, CMFD data had the best ability to simulate plateau precipitation annually, and in spring, summer, and winter. The models showed regional differences in describing fall precipitation. CRU and CMFD results were closest to observed values on the western plateau. (3) Plateau precipitation increased during spring, summer, and fall, especially in the summer, and decreased in the winter. (4) The annual and seasonal variation (spring, summer, and fall) in the CRU data was consistent with that of the observed data, and the winter precipitation results from ERA5 were consistent with observed values. (5) The deviation between CMFD results and observed annual and seasonal precipitation was the smallest. (6) Time series analysis showed that CMFD annual, spring, summer, and fall precipitation results were closest to the observed values, followed by CRU. CMFD winter precipitation results were closest to the observed values, but the correlation coefficient failed the significance test of 95%.

Keywords: Tibetan Plateau; precipitation; grid precipitation data; application assessment